

0-735532

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

На правах рукописи

Ханукаева Дарья Юрьевна

АЭРОТЕРМОБАЛЛИСТИКА ЕДИНОГО И ДРОБЯЩЕГОСЯ  
МЕТЕОРОИДА В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ АТМОСФЕРЕ

Специальность 01.02.05 - механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат

Диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Москва - 2002

A handwritten signature in black ink, located in the bottom right corner of the page. The signature is stylized and appears to be the author's name.

Работа выполнена в Московском физико-техническом институте (государственном университете)

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук,  
профессор Григорий Александрович ТИРСКИЙ

Официальные оппоненты:  
доктор физико-математических наук,  
профессор Александр Николаевич РУМЫНСКИЙ  
доктор физико-математических наук,  
профессор Владимир Игнатьевич КОНДАУРОВ

Ведущая организация:  
Институт автоматизации проектирования РАН

Защита диссертации состоится 24 декабря 2002 г.  
в 10 часов на заседании диссертационного совета  
К.212.156.06 в Московском физико-техническом институте.

Адрес: 141700,  
г. Долгопрудный Московской обл.,  
Институтский пер., д.9, Главный корпус

С диссертацией можно ознакомиться в научной  
библиотеке МФТИ.

Автореферат разослан « 6 » ноября 2002 г.

Ученый секретарь Совета  
кандидат физико-математических наук М.В. БЕРЕЗНИКОВА



Актуальность темы

Ежедневно в атмосферу Земли с метеорными скоростями (11-72 км/с) влетает порядка 70 млн. космических тел размерами от  $10^5$  см до нескольких метров - метеороидов - и взаимодействует с ней. Некоторые достигают поверхности Земли, и люди находят то, что называется метеоритами, другие порождают явление метеора или «падающей звезды», т.е. создают сильное свечение и ионизационный след в атмосфере. Особо яркие метеоры - болиды. Явление болидов вызывают довольно крупные тела (размером более 10 см), которые в случае столкновения с поверхностью планеты могут производить существенные разрушения и являться причиной образования кратеров и цунами. Понимание процессов взаимодействия крупных космических тел с атмосферами важно также для правильной интерпретации различных наблюдений в атмосфере. Спутники с помощью оптической аппаратуры практически ежедневно регистрируют яркие вспышки в атмосфере Земли на высотах 20-40 км.

Изучение метеорных явлений затрагивает широкий круг дисциплин и является полезным для астрономии, аэротермодинамики, физики, космологии. До сих пор ведутся дискуссии по поводу Тунгусского феномена; столкновение осколков кометы Шумейкеров-Леви 9 с Юпитером в 1994 г. усилило интерес к метеорной тематике во всем мире, активно обсуждается кометно-астероидная опасность. Поэтому построение комплексной физико-математической модели таких явлений представляется весьма актуальной задачей.

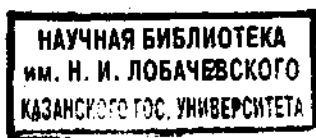
Прежде чем упасть на Землю или разрушиться в атмосфере метеороид активно взаимодействует с ней, а именно испытывает аэродинамическое сопротивление и нагревание, теряя свою кинетическую энергию.

Аэродинамическое сопротивление по мере приближения тела к поверхности планеты вызывает быстро нарастающие перегрузки, под действием которых тело может дробиться.

Аэродинамическое нагревание тела, летящего в атмосфере, является следствием передачи его энергии окружающей среде, что приводит ее в движение и нагревание за головной ударной волной до температур в несколько десятков тысяч градусов. От горячего ударного слоя между телом и головной ударной волной происходит интенсивное конвективно-радиационное нагревание самого тела. При этом температура поверхности тела достигает температуры плавления или даже кипения, и далее происходит потеря массы метеороида за счет плавления, испарения, шелушения и т.д., а также диссоциация, ионизация, излучение и многие другие неравновесные процессы в ударном слое.

При метеорных скоростях, которые являются гиперзвуковыми, аэродинамическое торможение и аэродинамическое нагревание существенно взаимодействуют друг с другом. Поэтому необходимо комплексное описание движения в атмосфере тела с переменной массой и формой под действием аэродинамического сопротивления и нагревания. Аэротермобаллистика дробящегося метеороида - теория, описывающая полет космического тела в атмосфере при интенсивном физико-химико-механическом взаимодействии с окружающей средой, когда аэродинамику, унос массы, дробление и баллистику нельзя отделить друг от друга.

Особенность физико-газодинамических процессов, происходящих при входе метеороидов, по сравнению с подробно исследованными процессами, сопровождающими вход в атмосферу объектов, созданных человеком (головных частей ракет, космических зондов и других), состоит в том, что средняя скорость первых намного выше. Поэтому гораздо более высокими оказываются температуры плазмы в ударном слое и величины потоков излучения. Последнее является доминирующим фактором, а не поправкой к тепловым потокам, определяемым обычной (молекулярной или электронной) теплопроводностью и турбулентным теплопереносом. Второй существенный фактор - интенсивное разрушение метеороидов в атмосфере под действием



сравнительно невысоких аэродинамических сил, причем часто многократное. В-третьих, размеры рассматриваемых здесь крупных метеороидов подчас больше размеров указанных объектов, и изменение оптических толщин плазмы воздуха и паров влияет как на величины потоков излучения, так и на их спектры. Вещество метеороидов весьма отлично от теплозащитных покрытий космических аппаратов – метеороиды испаряются значительно легче, подчас теряют много массы за счет поверхностной эрозии, сдува жидкой пленки, дробления, что дополнительно повышает потерю массы.

Несмотря на то, что факт дробления крупных метеороидов во время полета в атмосфере давно считается признанным, единой модели механизма этого явления до сих пор нет. Имеющиеся модели фрагментации метеороидов можно условно разбить на следующие идеологические группы: квазинепрерывное дробление, катастрофическое разрушение тела (гидродинамические модели), прогрессивное дробление. Модели гидродинамической группы, по-видимому, хорошо описывают поведение только особо крупных однородных тел, и иногда мелких, но чрезвычайно малопрочных. Большинство же наблюдаемых метеороидов дробится последовательно на несколько фрагментов, что можно описать в рамках модели прогрессивного дробления. Также можно показать, что катастрофическое разрушение содержится как предельный случай в предлагаемой модели прогрессивного дробления. Однако ни одна из упомянутых моделей не дает удовлетворительного объяснения неоднократно наблюдавшихся концевых вспышек мелких и теплового взрыва крупных метеороидов.

В классической физической теории метеоров (ФТМ), занимающейся изучением торможения, аэродинамической эрозии (уноса массы), свечения, дробления метеороидов в атмосфере делается два основных упрощающих предположения. Первое состоит в том, что атмосфера считается изотермической. Второе заключается в постоянстве

параметра уноса массы  $\sigma \equiv \frac{C_H}{Q C_D}$ ,  $C_D$ ,  $C_H$  – коэффициенты сопротивления и теплопередачи соответственно,  $Q$  – эффективная энтальпия уноса массы метеороида. Оба предположения являются очень сильными и приводят к существенным погрешностям в описании процесса входа космических тел в атмосферу. В данной диссертации удалось освободиться от обоих этих условий и получить аналитические решения как для реальной (неизотермической) атмосферы, так и для ряда случаев переменных коэффициентов.

В большинстве работ, посвященных дроблению метеороидов, вводятся упрощающие предположения относительно механизмов торможения и теплопередачи, массу метеороида считают постоянной. В результате получается не совсем корректное описание процесса. В данной диссертации развита модель прогрессивного равновесного дробления с учетом аэродинамической эрозии и получено аналитическое решение задачи, затем обобщенное на случай неизотермической атмосферы.

Кроме того, предложена оригинальная математическая модель конечного теплового взрыва болидов, более адекватно объясняющая наблюдательные данные.

В данной работе комплексно рассматривается баллистика и аэродинамика, механизмы торможения, теплопередачи, нагружения за счет сил инерции и фрагментация метеороидов. Сделана попытка объединения имеющихся знаний в этих областях с целью создания более полного описания такого сложного явления Природы, как полет болида.

### Целью настоящей работы является

Построение как можно более полной и адекватной модели взаимодействия метеороида с реальной (неизотермической) атмосферой, включающей аэродинамическое торможение, аэродинамическое нагревание и унос массы с поверхности тела

с учетом особенностей гиперзвукового обтекания, механическое дробление метеороида и возможный концевой взрыв.

### Научная новизна

1. Впервые получено аналитическое решение основных уравнений ФТМ для неізотермической атмосферы.
2. Впервые получено аналитическое решение задачи взаимодействия дробящегося космического тела с атмосферой и обобщено на случай неізотермической атмосферы.
3. Предложен новый, более простой и удобный способ вычисления коэффициентов сопротивления и конвективной теплопередачи метеороида при любых числах Рейнольдса. Получены аналитические решения с учетом этих зависимостей в ряде частных случаев.
4. Впервые в метеорной физике выведены структурные выражения для теплового потока и эффективной энтальпии уноса массы обтекаемого гиперзвуковым потоком тела произвольного химического состава с учетом гомогенных и гетерогенных реакций между продуктами диссоциации и ионизации набегающего воздуха и парами тела и с учетом экранирования теплового потока парами тела. Ранее эффективная энтальпия уноса массы определялась в ФТМ из наблюдательных данных по торможению и свечению метеоров [1].
5. Впервые на заключительной стадии движения раздробленного метеороида в модель введено разрушение под действием термонапряжений, позволившее объяснить наблюдаемое явление концевого теплового взрыва болидов.

## Практическая ценность

Полученные результаты способствуют более глубокому пониманию процессов, сопровождающих вход метеорных тел в атмосферу планеты. Найденные аналитические решения в рамках модели единого эродирующего тела и развитой в работе модели прогрессивно дробящегося тела, распространенные также на случай неизотермической атмосферы, существенно уточняют описание динамики, уноса массы и дробления метеороидов. Использование универсальных аналитических выражений для коэффициентов сопротивления, теплопередачи и эффективной энтальпии, полученных в работе, позволяет более адекватно моделировать потерю массы и скорости метеороида. Введенная модель конечного взрыва дает строгое математическое объяснение наблюдающихся вспышек болидов и отсутствия метеоритов после их пролета.

Кроме того, полученные результаты будут важны для адекватного решения обратной задачи метеорной физики, которая состоит в том, чтобы по наблюдательным данным взаимодействия космического тела с атмосферой планеты восстановить его исходные параметры: массу, плотность, скорость входа и др.

## Защищаемые положения

1. Модель механического разрушения метеороида в полете.
2. Аналитическое решение задачи баллистики дробящегося метеороида.
3. Решения задачи движения единого и дробящегося тела в случае неизотермической атмосферы.
4. Способ вычисления коэффициента сопротивления метеороида при любых режимах обтекания.
5. Выражение для эффективной энтальпии уноса массы метеороида с учетом вдува паров тела.



6. Модель конечного взрыва роя осколков раздробленного метеороида.

### Структура работы

Диссертация состоит из Введения, трех глав и Заключения, содержит 42 рисунка и библиографию из 155 наименований.

### Основное содержание работы

Во Введении приводится краткий обзор литературы по проблеме моделирования физики метеорных явлений. Здесь следует отметить работы отечественных и зарубежных исследователей: Бронштэна, Григоряна, Коробейникова и коллег, Немчинова и коллег, Стулова, Фадеевко, Baldwin and Sheaffer, Ceprecha и коллег, ReVelle [1-9], внесших существенный вклад в понимание и моделирование взаимодействия метеороидов с атмосферой. Обосновывается актуальность темы диссертационной работы и формулируются ее цели, отмечается научная новизна и практическая ценность проведенных исследований, формулируются основные защищаемые положения.

Первая глава посвящена постановке задачи взаимодействия космического тела с атмосферой, обсуждению основных уравнений и входящих в них величин.

В §1.1 после анализа и оценки членов, входящих в полное уравнение торможения, выписано классическое уравнение торможения, а также уравнение уноса массы метеороида [1]:

$$\begin{aligned} M\dot{V} &= -\frac{1}{2} AC_D \rho V^2, \\ Q\dot{M} &= -\frac{1}{2} AC_H \rho V^3. \end{aligned}$$

Здесь  $M$ ,  $V$ ,  $A$  - масса, скорость, площадь миделя метеороида,  $\rho$  - плотность атмосферы.

Как теоретически, так и количественно показано, что на большом начальном отрезке траектории метеороида главным членом является сила тяжести, а не сила сопротивления. Дано более корректное обоснование возможности исключения силы тяжести и сохранения классической записи уравнения торможения.

В §1.2 обсуждаются формы летящих метеороидов, неопределенность которых является одной из трудностей задачи. Введено выражение, связывающее площадь миделева сечения метеороида с его массой и плотностью  $S$  через формфактор  $f$  и параметр изменения формы. Рассмотрены возможные значения последних двух величин, которые в данной работе традиционно приняты постоянными, соответствующими неизменной сферической форме метеороида, т.е. площадь миделя определяется как

$$A = f \left( \frac{M}{\delta} \right)^{2/3}.$$

В §1.3 собран материал по свойствам атмосфер Земли, Марса, Венеры и Юпитера, который наглядно демонстрирует существенную их неизотермичность. Даны определения шкал высот по плотности и давлению, которые в случае неизотермической атмосферы являются переменными, и связь между высотой над поверхностью планеты и давлением, заменяющая известную зависимость  $\rho = \rho_0 e^{-z/h}$  для изотермической атмосферы с постоянной шкалой высот  $h$  ( $\rho_0 = 1,225 \text{ кг/м}^3$ ).

В §1.4 дана подробная классификация газодинамических и физико-химических режимов обтекания, имеющих место при прохождении метеороида сквозь атмосферу. На количественном примере показано, что использование числа Кнудсена, вычисленного по параметрам набегающего потока, может давать заниженные высоты перехода между свободно-молекулярным, переходным и континуальным режимами.

§1.5 посвящен обсуждению коэффициента сопротивления  $C_D$ , который характеризует долю количества движения

набегающего потока, передаваемую обтекаемому телу. Она зависит от режима обтекания, который испытывает тело. Поскольку диапазон режимов обтекания при входе метеороидов в атмосферу меняется от свободно-молекулярного до континуального с образованием тонкой ударной волны и пограничного слоя на поверхности тела, то коэффициент сопротивления является функцией параметров, характеризующих условия обтекания. Дан подробный обзор имеющихся способов вычисления коэффициента сопротивления в различных режимах обтекания, и предложена простая и удобная для применения формула, отражающая зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса  $Re_\theta$ , вычисляемого по температуре торможения:

$$C_D = C_D^c + (C_D^{fm} - C_D^c) e^{-a Re_\theta^2},$$

в которой используются теоретически вычисляемые значения коэффициента сопротивления в континуальном и свободно-молекулярном пределах ( $C_D^c$  и  $C_D^{fm}$  соответственно), а свободный параметр  $a$  был определен на основе экспериментальных данных.

В §1.6 обсуждаются особенности конвективного и радиационного потоков тепла к поверхности тела при метеорных скоростях и способы их аппроксимации. В данной работе используется упрощенная модель, предполагающая непосредственное суммирование конвективного и излучательного потоков энергии.

В связи с этим коэффициент теплопередачи вычисляется в §1.7 как сумма конвективной и радиационной составляющей  $C_H = C_{Hcon} + C_{Hrad}$ . Поскольку коэффициент теплопередачи представляет собой долю энергии набегающего потока, передаваемую телу, то зависит не только от режимов обтекания как  $C_D$ , но и от конкретного механизма передачи энергии, а - также от вызываемого нагревом разрушения поверхности тела и, как следствие, экранирования теплового потока парами тела.

Для вычисления конвективного коэффициента теплопередачи предложена формула, аналогичная той, что используется для вычисления коэффициента сопротивления:

$$C_{Hcon} = \frac{b}{\sqrt{Re_0}} + \left( 1 - C_{Hrad} - \frac{b}{\sqrt{Re_0}} \right) e^{-c Re_0^2}.$$

При этом полагалось, что в свободно-молекулярном режиме  $C_{Hf}^m = 1$ , и использовалась известная аппроксимация в континуальном режиме  $C_{Hcon}^c \sim 1/\sqrt{Re_0}$ . О д н ы е коэффициенты  $b$  и  $c$  определялись по численным данным.

К сожалению, найти приближенную формулу для излучательного коэффициента теплопередачи во всех режимах обтекания пока не удалось. Поэтому в работе используются аппроксимационные зависимости, известные в литературе, напр., в [9].

В §1.8, посвященном уносу массы метеороида, конкретный механизм которого в течение многих лет был предметом дискуссии среди специалистов, дан строгий теоретический вывод структурного выражения для эффективной энтальпии уноса массы обтекаемого гиперзвуковым потоком тела произвольного химического состава с учетом гомогенных и гетерогенных реакций между продуктами диссоциации и ионизации набегающего воздуха и парами тела. После оценки членов полученного выражения сделан вывод о целесообразности использования выражения  $Q = Q_0 + \eta V^2/2$ . Здесь  $Q_0$  - суммарная теплота фазовых переходов материала тела из конденсированного состояния в газообразное плюс энергия, требуемая на его нагрев от начальной температуры до температуры поверхности. А член  $\eta V^2/2$  ( $\eta \sim 0,2-0,6$ ) представляет собой эффект экранирования теплового потока парами тела.

Вторая глава посвящена решению задачи в рамках модели единого тела.

В §2.1 обсуждается проблема начального разогрева поверхности метеороида до температур плавления и

испарения, который происходит в верхних слоях атмосферы, и таким образом в выбранном диапазоне высот задачи ( $0 < z < 120$  км) может не рассматриваться.

Предположение классической ФТМ о постоянстве параметра уноса массы а фактически означает постоянство каждой из величин, входящих в его определение, и широко используется даже в современных работах по метеорной физике, несмотря на замечания о переменности коэффициентов, сделанные выше. Это предположение позволяет получить хорошо известный в метеорной физике

интеграл массы  $\frac{M}{M_e} = e^{\frac{\sigma}{2}(v^2 - v_e^2)}$ . В §2.2 он используется при

анализе обоснованности и области применимости простейшей модели метеороида - модели, предполагающей пренебрежимо малую потерю массы. Аналитически и с большим количеством графических примеров показано, что относительное изменение массы превышает относительное изменение скорости в большом диапазоне высот, и особенно на начальных участках траектории, т.е. главным процессом является потеря массы, а не потеря скорости метеороида. Т.о., когда при рассмотрении баллистики и разрушения метеороидов предлагается пренебречь уносом массы, как это делается во многих работах, нельзя обосновывать это допущение малостью относительной потери массы. При этом на первом этапе вплоть до начала разрушения надо пренебрегать и торможением тоже, т.е. считать скорость метеороида постоянной и равной скорости входа.

В §2.3 дано решение уравнения уноса массы как главного из основных уравнений ФТМ, поскольку унос массы на большей части траектории метеороида - более быстрый процесс, чем потеря скорости. Это решение получено для неизотермической атмосферы и имеет вид

$$M = M_e (1 - u_e \Delta \bar{p})^3 \approx M_e (1 - u_e \bar{p})^3,$$

где  $u_e \equiv \frac{1}{6} \sigma V_e^2$ ,  $\Delta \bar{p} = \bar{p} - \bar{p}_e$ ,  $\bar{p} = \frac{p}{p_m}$ ,  $\bar{p}_e = \frac{p_e}{p_m}$ ,

$$p_m = \frac{M_e g \sin \theta}{C_D A_e}, \quad p - \text{давление воздуха, } g - \text{ускорение силы}$$

тяжести,  $\theta$ - угол наклона траектории к горизонту.

В §2.4 подробно аналитически решена задача о входе идеального метеороида (не подверженного уносу массы). Рассматривать одно только уравнение торможения можно, несмотря на замечания, сделанные выше, поскольку изменение массы не оказывает сильного влияния на скорость метеороида.

В §2.5 рассмотрена баллистика метеороида с переменным коэффициентом сопротивления, определяемым формулой, предложенной в §1.5. Получено аналитическое решение. Отдельно учтено влияние эффекта вырывания конгломератов частиц на коэффициент сопротивления тела в свободно-молекулярном режиме и также получено аналитическое решение. Приведены результаты численного решения задачи переменным коэффициентом сопротивления, учитывающим указанные особенности свободно-молекулярного предела. Найден критический размер микрометеороида, для которого полученное уточнение решения существенно.

В §2.6 рассмотрена баллистика метеороида переменной массы. Впервые найдено решение основных уравнений ФТМ для случая неизотермической атмосферы. Оно имеет вид

$$\bar{p} - \bar{p}_e = e^{-u} (Ei(u_e) - Ei(u)),$$

где  $u \equiv \frac{1}{6} \sigma V^2$ ,  $Ei(u)$  - интегральная экспонента. Дополняющий

решение интеграл массы уже выписывался выше. Полученное решение было подробно проанализировано. Определены законы изменения торможения, скоростного напора, погонной потери кинетической энергии метеороида, найдены их максимумы и проведено сравнение с результатами, полученными для метеороида постоянной массы. В конце этого параграфа доказано существование аналитического

решения уравнений ФТМ при переменной энтальпии уноса массы, учитывающей влияние вдува паров, при постоянных значениях коэффициента сопротивления и теплопередачи.

В §2.7 дано численное решение основных уравнений ФТМ при всех переменных коэффициентах. На основе полученных графиков наглядно демонстрируется существенность учета переменности коэффициентов. Некоторые из полученных кривых приведены на рис.1.

Третья глава посвящена проблеме дробления метеороидов, а также обсуждению некоторых приложений разработанной модели.

В §3.1 дан подробный обзор имеющихся моделей дробления метеороидов. Введено понятие прочности и критерий начала дробления метеороидов в общем виде, состоящий в равенстве аэродинамической нагрузки некой условной прочности  $\sigma^*$ , фигурирующей в какой-либо теории,  $\rho V^2 = k\sigma^*$ , где  $k \sim 3-4$ . Далее изложены основные идеи модели прогрессивного равновесного дробления (ПРД), развиваемой в данной работе. Преимущество предлагаемой модели разрушения заключается в том, что ее включение в сценарий взаимодействия метеороида с атмосферой позволяет получить аналитическое решение даже при учете уноса массы с поверхности тела за счет испарения и плавления. Не изучается начальная стадия, когда могли действовать растягивающие напряжения при изгибном нагружении нерегулярной формы, и движение осколков еще не стало аэродинамически независимым. Подробно рассматривается баллистика роя независимых осколков. Предлагаемая модель при предельных значениях определенного ниже параметра  $\alpha$  переходит соответственно в квазижидкостную (модель Григоряна [2]) ( $\alpha \rightarrow 0$ ), либо в модель единого тела ( $\alpha \rightarrow \infty$ ), а также содержит другие частные случаи, напр., модель Иванова и Рыжанского (см. ссылку в [4]).

В §3.2 дано количественное описание модели. В случае дробящегося тела эффективная площадь мишени роя осколков  $A$  увеличивается и будет зависеть от числа фрагментов  $N$ .

$$A = f \left( \frac{M}{\delta} \right)^{2/3} N^{1/3}, \quad f = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f_k.$$

В этом выражении формфактор  $f$  является средним между  $N$  факторами  $f_i$  отдельных фрагментов.

Для определения числа кусков  $N$  предполагается, что метеороид распадается на одинаковые фрагменты массы  $M_f = M/N$ , прочность которых далее будет зависеть от их массы  $M_f$  в соответствии со статистической теорией Вейбулла. Предполагается равновесное размножение осколков, состоящее в том, что размер осколка или их количество  $N$  определяется условием равенства его прочности скоростному напору, и это количество непрерывно меняется вместе со скоростным напором. Тогда

$$N = \frac{M}{M_*} \left( \frac{\rho V^2}{\rho_* V_*^2} \right)^{1/\alpha}$$

где  $\alpha$  - масштабный фактор, характеризующий степень неоднородности тела, а звездочкой здесь и далее помечаем значения переменных на высоте начала разрушения.

Далее модель была усовершенствована с учетом запаздывания в образовании отдельно летящих фрагментов после выполнения условия разрушения. Это запаздывание определяется временем, потребным на расхождение фрагментов. Выведена формула для вычисления поправки к значению высоты, на которой образуется  $N$  фрагментов.

При моделировании движения метеороидов, испытывающих дробление в полете, в данной диссертации предлагается следующий сценарий процесса.

I этап. Вход в атмосферу тела с заданными параметрами. Торможение и аэродинамическая эрозия тела как единого целого до момента начала разрушения. Рассматривалась в Главе II.



II этап. Дальнейшее торможение тела с потерей массы, а также дроблением на куски при выполнении условий разрушения.

III этап. Падение осколков на Землю, их аэродинамическая эрозия, «взрыв».

В §3.3 рассмотрен второй этап в рамках модели ПРД. Впервые найдено аналитическое решение задачи баллистики дробящегося метеороида с учетом уноса массы:

$$V = V_* \left[ 1 + \frac{\bar{\rho}_*}{1 + 3\alpha} \left( \tilde{\rho}^{\frac{1}{3\alpha} + 1} - 1 \right) \right]^{-\frac{3\alpha}{2}},$$

где  $\bar{\rho}_* = \frac{h\rho_* C_D A_*}{M_* \sin \theta}$ , а волной отмечены величины, отнесенные к своим значениям в момент начала разрушения.

Далее рассмотрено условие окончания дробления. Найдены аналитически все параметры роя осколков в этот момент, а именно, их скорость, положение, количество, масса, размеры.

В §3.4 впервые в метеорной физике дано обобщение решения задачи баллистики дробящегося метеороида, полученного в предыдущем параграфе, на случай неизотермической атмосферы. Все результаты представлены в аналитическом виде.

Также в этом параграфе приведены результаты численного решения задачи с учетом переменности всех коэффициентов. На рис.1 для сравнения даны кривые изменения скорости и массы тела в рамках модели единого и дробящегося тела, построенные для входных параметров болида Бенешов ( $V_e = 21 \text{ км/с}$ ,  $M_e = 3,2 \text{ т}$ ,  $\delta = 2 \text{ г/см}^3$ ,  $\theta = 30^\circ$ ). Для сравнения там же

построены классическое решение  $V_{cl} = V_e e^{-\frac{C_D \rho h A}{2M \sin \theta}}$  и решение для изменения массы, найденное в §2.3, но записанное для изотермической атмосферы.

В §3.5 исследуется заключительная стадия движения раздробленного метеороида. Вводится понятие конечного теплового «взрыва» метеороида. Под взрывом метеороида

будем понимать полный унос его массы на очень малом интервале высот ( $\sim 1$  км), или иными словами очень быструю передачу кинетической энергии тела атмосфере. В данной работе предлагается на заключительной стадии движения раздробленного метеороида учесть возникающие из-за больших перепадов температуры во всем объеме мелких осколков термонапряжения, которые, как показывают сделанные оценки, нередко превышают предел прочности осколков и влекут дальнейшее их дробление до размеров крупного песка и пыли, мгновенно испаряющихся в раскаленном газовом облаке и образующих, таким образом, взрыв. Это означает, что кривая погонной потери кинетической энергии тела с высотой имеет резкий максимум, сосредоточенный в узком интервале высот, проходимом разрушенным метеороидом за доли секунды. Подобный вид кривой изменения погонной кинетической энергии впервые получен в данной работе и приведен на рис.3в. Для сравнения даны кривые потери погонной кинетической энергии для модели единого тела (рис.3а) и дробящегося, но без учета термонапряжений (рис.3б). Все они построены по входным параметрам Тунгусского тела:  $V_e=35\text{ км/с}$ ,  $M_e=10^9\text{ кг}$ ,  $\theta=30^\circ$ ,  $\delta=10^3\text{ кг/м}^3$ , значения начальной прочности и масштабного фактора подобраны в соответствии с данными наблюдений по высотам начала и окончания дробления.

Рассмотренная фаза терморазрушения может и не наступить, если осколки, образовавшиеся в результате дробления под действием сил инерции, будут достаточно крупными - они в этом случае выпадут на поверхность планеты.

В §3.6 проведен анализ разработанной модели на примере нескольких из известных падений метеорных тел с использованием результатов наблюдательных данных. Некоторые из полученных кривых, построенных по параметрам болида Бенешов, приведены на рис.2.

В §3.7 полученные в диссертации решения задачи баллистики единого и дробящегося тела применяются для

объяснения «парадокса масс», заключающегося в отличии динамических и фотометрических масс наблюдаемых метеороидов.

В §3.8 затронута популярная тема кометно-астероидной опасности. На конкретных примерах показано, как полученные в диссертации решения могут быть использованы для предсказания результатов входа в атмосферу космических тел.

В Заключении приводятся основные результаты и выводы диссертации.

### Список цитированной литературы

1. *Бронштэн В.А.* Физика метеорных явлений. - М.: Наука, 1981.-416с.
2. *Григорян С.С.* О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет // Космич. иссл. 1979. - Т. 17. - Вып.6. - С. 875-893.
3. *Коробейников В.П., Чушкин П.И., Шуршалов Л.В.* Комплексное моделирование полета и взрыва в атмосфере метеорного тела // Аст. вест. 1991. - Т.25. - №3. - С. 61-75.
4. *Немчинов К.В., Попова О.П., Тетерев А.В.* Внедрения крупных метеороидов в атмосферу: теория и наблюдения // Инж-физ. ж. 1999. - Т.72. - №6. - С. 1233-1265.
5. *Стулов В.П.* Аналитическая модель последовательного дробления и абляции метеорного тела в атмосфере // Аст. вест. 1998. - Т.32. - №56. - С. 455-458.
6. *Фадеев Ю.И.* Разрушение метеорных тел в атмосфере // ФГВ 1967. - №2. - С. 276-280.
7. *Baldwin B. and Y. Sheaffer* Ablation and Breakup of Large Meteoroids during Atmosferic Entry // J. Geoph. Res. - 1971. - V.76.-№19.-P. 4653-4668.
8. *Cep-lecha Z.J., BorovickaJ., ElfordW.G., ReVelle D.O., Hawkes R.L., Porubcan V. and Simek M.* Meteor phenomena and bodies // Space Sci. Rev. - 1998. V.84. - P. 327-471.

9. *ReVelle D.O.* Dynamics and thermodynamics of large meteor entry: a quasi-simple ablation model // Planetary Sciences SR-76-1, July 1976.-92 p.

### Апробация

Основные результаты диссертации докладывались на Всероссийских конференциях по механике, астрономии, теплофизике в 1999-2002 г., международной конференции по проблеме Тунгусского феномена в Москве в 2001 г., на 22-м Symposium on Shock Waves в Лондоне в 1999 г., на 23-м Symposium on Rarefied Gas Dynamics в Канаде в 2002 г., ряде научных конференций МФТИ и МГУ.

### Публикации

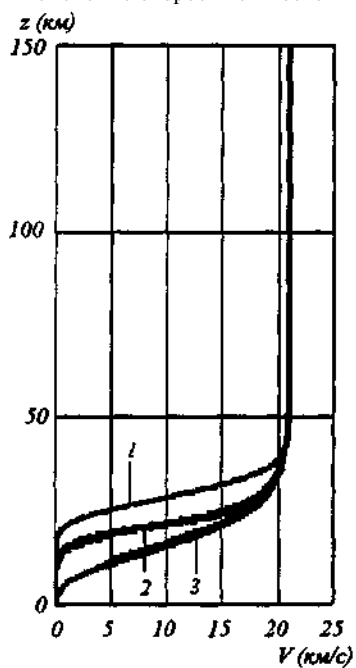
По материалам диссертационной работы опубликовано 11 печатных работ.

Основные положения диссертации изложены в следующих печатных работах:

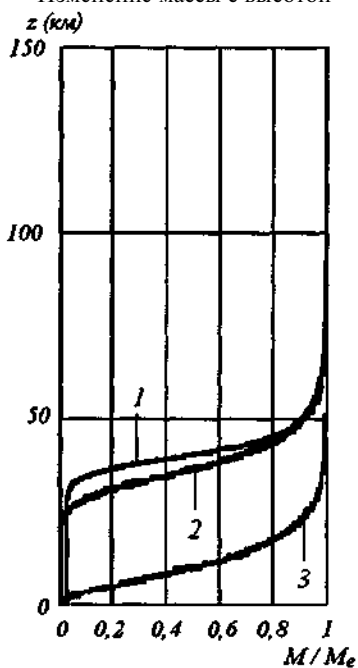
1. *Тирский Г.А., Ханукаева Д.Ю.* Аэротермобаллистика болидов // XLI научная конференция МФТИ: Сб. тез./МФТИ- М., 1998. - С. 76.
2. *Тирский Г.А., Ханукаева Д.Ю.* Аэротермобаллистика дробящихся и взрывающихся метеороидов // Современные проблемы механики: Сб. тез. юбилейной научной конф., поев. 40-летию Ин. Мех. МГУ./МГУ - М., 1999. - С. 182.
3. *Ханукаева Д.Ю.* Взаимодействие крупных метеороидов с атмосферой // XLII научная конференция МФТИ: Сб. тез./МФТИ- М., 1999. - С. 77.
4. *Tirskiy G.A., Khanuckaeva D.Y.* Aerothermoballistics of breaking up large cosmic bodies // 22<sup>nd</sup> Conf. On ISSW: Proc./Imperial College. - London. UK., 1999. - P. 739-744.
5. *Тирский Г.А., Ханукаева Д.Ю.* Взаимодействие космических тел с атмосферами Земли и планет. Кометно-

- астероидная опасность - угроза из космоса // VII Всероссийский съезд по теор. и прикл. механике: Сб. тез./ИМСС УрО РАН. - Пермь, 2001. - С. 558.
6. Ханукаева Д.Ю. Некоторые вопросы кометно-астероидной опасности // VI Королёвские чтения: Сб. тез./Сам. науч. ц. РАН. - Самара, 2001. - С. 217-218.
  7. Тирский Г.А., Ханукаева Д.Ю. Модель взаимодействия космических тел с неизотермической атмосферой // Околоземная астрономия XXI века: Сб. трудов конф./Геос. - М., 2001. - С. 367-378.
  8. Ханукаева Д.Ю. Математическая модель движения космического тела в атмосфере планеты // Актуальные проблемы механики: Сб. трудов XXIX Летней школы (АРМ 2001), Санкт-Петербург (Репино), 21-30 июня 2001 ./ИПМаш РАН. - СПб., 2002. - С. 707-719.
  9. Ханукаева Д.Ю. К вопросу о коэффициентах в уравнениях физики метеорных явлений // Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики: Сб. тезисов VII Всероссийской конференция молодых ученых, Новосибирск./ИТСО РАН. - Новосиб., 2002. - С. 96-97.
  10. Khanukaeva D.Yu. On the coefficients in meteor physics equations // 23<sup>rd</sup> International Symposium on RGD, Wistler, Canada: Proc./AIP. - 2002. - (in press).
  11. Ханукаева Д.Ю. Математическая модель движения метеороида в атмосфере при переменном коэффициенте сопротивления и аналитические решения // Обработка информации и моделирование: Сб. ст./МФТИ. - М., 2002. - (в печати).

Изменение скорости с высотой



Изменение массы с высотой



1 - численное решение с учетом дробления;

2 - численное решение без дробления.

3 - классическое аналитическое решение [1].

Рис. 1. Результаты численного решения уравнений ФТМ с переменными коэффициентами.

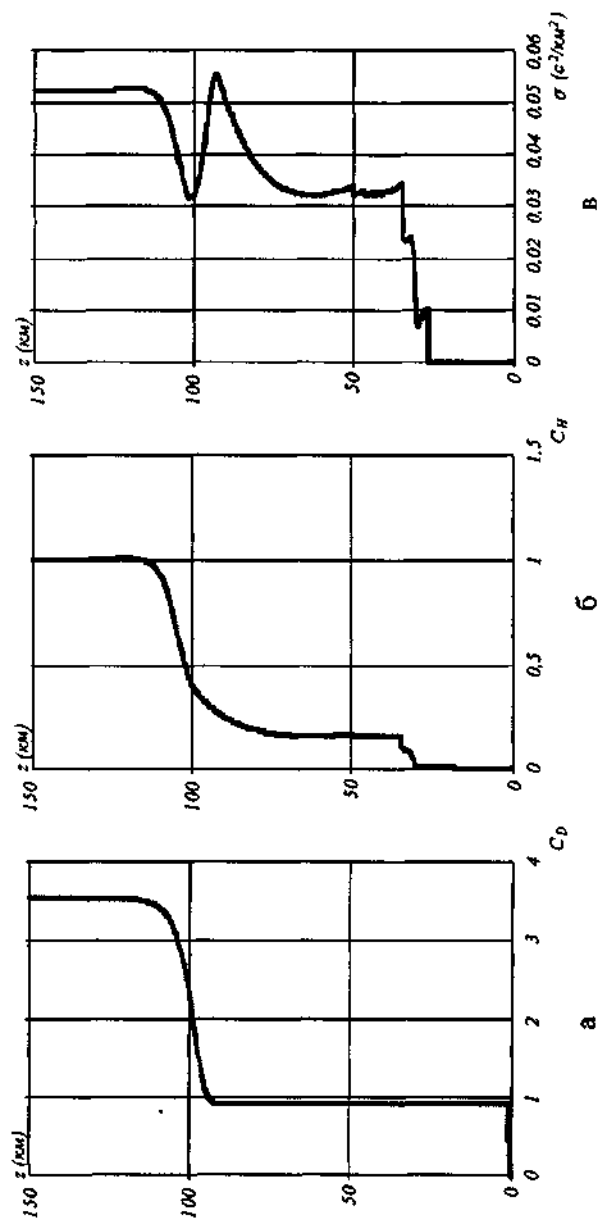


Рис.2. Расчетные кривые изменения коэффициента сопротивления (а), коэффициента теплопередачи (б), параметра уноса массы (в) с высотой в рамках модели дробящегося тела для входных параметров болида Бенешов.

Погонная потеря кинетической энергии

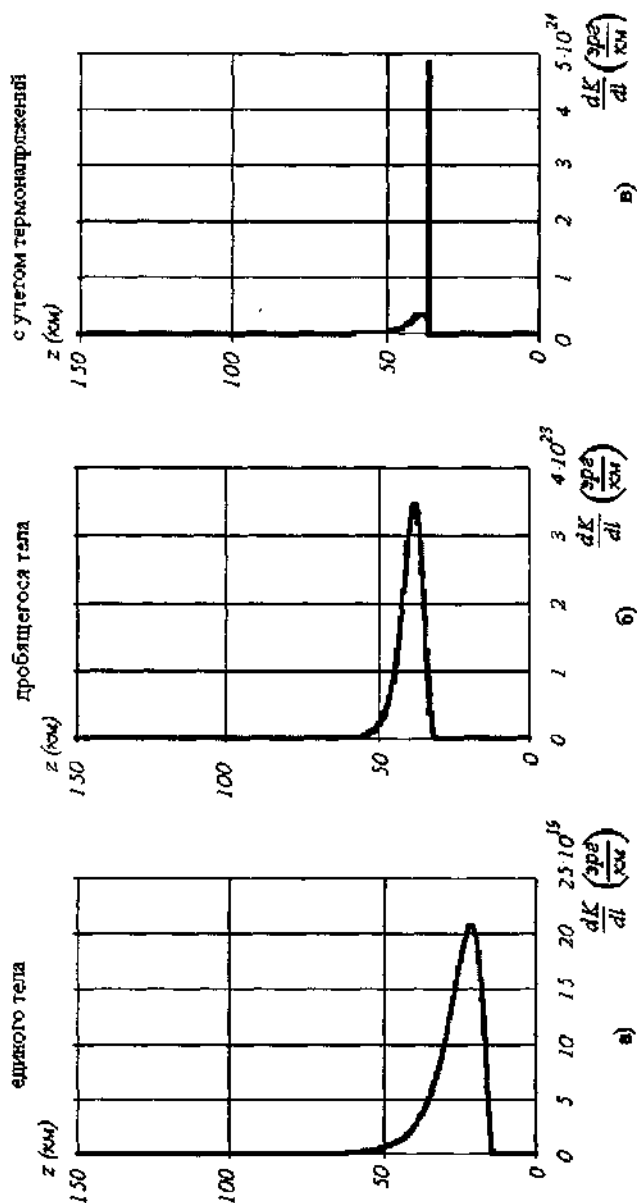


Рис.3. Расчетные кривые потери кинетической энергии метеороида на единицу длины пути, рассчитанные в рамках различных моделей для входных параметров Тунгусского тела.